引文格式：汤明国. 利用电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 97-101. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.021

利用电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法

汤明国
（国家能源集团 新疆能源有限责任公司，新疆 乌鲁木齐 831800）

摘　要：红沙泉煤矿封闭区域内车辆往来频繁，车辆的相对位置和姿态标定受到影响，导致车辆定位的连续性和准确性受限。提出了基于电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法。通过电子围栏技术设计车辆定位架构，基于平行线算法设定电子围栏边界，采用SINS/DR辅助的卫星信号捕获方法获取电子围栏边界内的车辆位置信息；引入HMM地图匹配算法精确比对获取的车辆位置与高精度地图中的道路位置，修正定位误差，实现红沙泉煤矿封闭区域车辆定位。结果表明，在GPS信号盲区该方法的定位结果具有较好的连续性和准确性，展现出高精确度的车辆定位水平。

关键词：电子围栏；红沙泉煤矿；封闭区域；车辆定位；平行线算法；地图匹配算法
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0097-05

Vehicle Positioning Method in the Enclosed Area of Hongshaquan Coal Mine Based on Electronic Fence Technology

TANG Mingguo
(Xinjiang Energy Co., Ltd., National Energy Group, Urumqi 831800, China)

Abstract: The frequent traffic within the enclosed area of Hongshaquan coal mine has affected the relative position and attitude calibration of vehicles, resulting in limited continuity and accuracy of vehicle positioning. Therefore, we proposed a vehicle positioning method in the enclosed area of Hongshaquan coal mine based on electronic fence technology. We designed a vehicle positioning architecture using electronic fence technology, set the boundaries of electronic fence based on parallel line algorithm, used the satellite signal capture method assisted by SINS/DR to obtain vehicle positioning information within the boundaries of electronic fence, introduced HMM map matching algorithm to accurately compare the obtained vehicle positioning information with the road position information in high-precision maps, corrected positioning errors, and achieved vehicle positioning in the enclosed area of Hongshaquan coal mine. The experimental result shows that this method has good continuity and accuracy of vehicle positioning in GPS signal blind spots, demonstrating the high precision of vehicle positioning.

Key words: electronic fence, Hongshaquan coal mine, enclosed area, vehicle positioning, parallel line algorithm, map matching algorithm

红沙泉煤矿封闭区域来往车数量较多，导致出入矿区的道路拥堵不堪，还存在较大的安全隐患。通过车辆定位方法可以实时监控车辆的行驶轨迹和速度，了解车辆的实时位置和状态[1]，有助于矿企调度车辆，提高运输效率。许多学者[2-5]对车辆定位技术进行了深入研究，各方法均存在优势与不足。本文提出了一种基于电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法，首先构建基于电子围栏技术的车辆定位架构，再采用平行线算法设定红沙泉煤矿封闭区电子围栏边界，最后采用SINS/DR辅助的卫星信号捕获方法和HMM地图匹配算法，实现封闭区内车辆的高精度定位[6]。

1　红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法

1.1　基于电子围栏技术的车辆定位架构

基于电子围栏技术的车辆定位架构采用层次化与模块化的架构设计，分为数据层、业务处理核心层和应用层。数据层负责实时采集电子围栏信息，捕获GPS卫星定位数据、车辆行驶轨迹数据和车辆状态信息等。业务处理核心层则依托GIS引擎，实现数据的存储访问、读写以及日常管理和违规行为的智能检测等关键功能。应用层专注于构建电子围栏综合服务、运行维护管理以及车辆管理与调度功能，为用户提供直观易用的操作界面和出色的交互体验。电子围栏综合服务功能显示电子围栏边界[7]；并结合卫星定位数据获取电子围栏边界内的车辆位置信息。通过地图服务模块采用HMM地图匹配算法将GPS获取的车辆位置与高精度地图中的道路位置进行精确比对，修正定位误差，提升红沙泉煤矿封闭区域车辆定位精确度。

1.2　基于平行线算法的电子围栏边界

为确保车辆在红沙泉煤矿封闭区域内安全行驶，

作者简介：汤明国（1989—），本科，工程师，研究方向为露天煤矿机电、智能矿山、信息与通讯技术，E-mail：ionmqi2@163.com。

设置了电子围栏边界，能在围栏圈定范围内对车辆实施有效监控与精确定位。红沙泉煤矿封闭区域边界为多边形，本文采用平行线算法设定电子围栏边界。首先沿红沙泉煤矿封闭区域各边线方向生成一条内侧平行线；再连接相邻平行线的交点，形成内缩多边形，即红沙泉煤矿封闭区域电子围栏边界。

平行线算法的关键在于计算线段的单位法向量[8]，并通过该法向量的方向确定线段的平移方向。设 $h_1(x_1,y_1)$ 、 $h_2(x_2,y_2)$ 为红沙泉煤矿封闭区域内线段的两个端点，线段 h_1h_2 的法向量为 $\boldsymbol{n}=(C,D)$ ，则向量 $\overrightarrow{h_1h_2}$ 与 $\boldsymbol{n}$ 是正交的或者它们是垂直的（ $\overrightarrow{h_1h_2}$ 与 $\boldsymbol{n}$ 的点积为0），即

$$(C,D)\times(x_2-x_1,y_2-y_1)=0 \tag{1}$$

$$C(x_2-x_1)+D(y_2-y_1)=0 \tag{2}$$

线段 h_1h_2 的长度为：

$$l_{h_1h_2}=((x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2)^{1/2} \tag{3}$$

则可获得单位法向量为：

$$(C,D)=(-\frac{y_2-y_1}{l_{h_1h_2}},\frac{x_2-x_1}{l_{h_1h_2}}) \tag{4}$$

将直线沿着其法向量的方向进行平移，可以构造出与红沙泉煤矿封闭区域边界平行的电子围栏边界线。若初始平移距离设定为坐标系单位1（即每个端点在各自方向上移动1个单位），则可通过将该距离乘以倍数来调整平移距离。红沙泉煤矿封闭区域边界点的排列顺序将决定平行线的平移方向：逆时针排列使边界线向内平移，顺时针排列则向外平移。因此，计算平移时采用逆时针排列。

1.3 SINS/DR辅助的卫星信号捕获方法

数据层通过卫星信号可获取车辆在红沙泉煤矿封闭区域内的精确位置信息，可确保车辆在电子围栏边界内行驶，防止未经允许的车辆越界、造成车辆拥堵，避免安全隐患。车辆定位过程中捕获GPS卫星信号时会遇到多普勒频移现象，产生定位误差[9]，从而降低车辆定位的精确度。产生多普勒频移的主要原因是卫星与接收载体（红沙泉煤矿封闭区域内车辆）之间的相对运动以及卫星时钟和接收机时钟各自的误差。多普勒频移的表达式为：

$$g=g_{dy}+g_{rc}-g_{sc} \tag{5}$$

式中， g_{sc} 、 g_{rc} 为卫星和接收机的时钟误差频率； g_{dy} 为卫星与车辆间相对运动引发的频移。

对 g 起决定性作用的是 g_{dy} ，因此在不考虑 g_{sc} 、 g_{rc} 时，可通过车辆速度数据和卫星导航信息预测二者的多普勒频移，即

$$g=g_{dr}+g_z \tag{6}$$

式中， g_{dr} 、 g_z 为卫星、车辆运动引起的多普勒频移。

据此，采用并行码相位搜索技术，将通过SINS和DR获得的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位数据整合至GPS接收机中，预先估算多普勒频率，从而加快卫星信号的捕获进程[10]。卫星信号的捕获步骤包括：

1）利用星历表提供的数据推算卫星运动过程中产生的多普勒频移，即

$$g_{dr}=\frac{g_r v_s r_e}{c r_s} \tag{7}$$

式中， g_r 为GPS卫星的载波频率； c 、 r_e 为光速和地球半径； r_s 为卫星轨道的平均半径； v_s 为卫星在轨道中的运行速度。

2）分析计算SINS和DR组合定位技术，得到红沙泉煤矿封闭区域车辆速度[11]，即

$$v_z=\sqrt{(U_{ety}^t)^2+(U_{etx}^t)^2} \tag{8}$$

式中， U_{etx}^t 、 U_{ety}^t 为车辆在 X 和 Y 方向的速度分量。

计算由车辆运动引起的多普勒频移[12]，则有：

$$g_z=\frac{g_r\sqrt{(U_{ety}^t)^2+(U_{etx}^t)^2}}{c} \tag{9}$$

3）计算得到卫星信号多普勒频移。

4）将基于电子围栏技术的车辆定位架构接收的卫星信号与经过多普勒频移补偿的本地生成信号进行混频处理，得到 I （同相）和 Q （正交）两个信号分量。

5）对 I 和 Q 信号执行傅里叶变换，再将变换后的信号与已经过复数共轭变换和傅里叶变换的本地粗捕获码进行相乘操作，并计算乘积的模值，该模值即为基于电子围栏技术的车辆定位架构中数据层最终捕获的卫星信号车辆定位结果。

1.4 利用HMM地图匹配算法修正误差后的车辆定位

利用SINS和DR捕获卫星信号，虽能提供较准确的车辆位置信息，但受卫星轨道误差等因素影响，车辆实际位置可能会偏离其真实所在[13]。基于HMM地图匹配算法能将车辆GPS定位数据与高精度地图中的道路位置信息进行精确比对，修正定位误差，从而显著提升车辆定位精确度。对于车辆轨迹 $T=\langle b_1,b_2,\cdots,b_n\rangle$ 和红沙泉煤矿电子围栏区域 G ，基于HMM地图匹配算法可分为3个关键步骤：

1）寻找候选点。为加速轨迹中每辆GPS定位车辆 b_i 的定位过程，对红沙泉煤矿电子围栏区域构建高

效的空间索引结构[14]。索引结构能迅速锁定车辆 b_i 周围 β 范围内（设 $\beta=100$ m）的潜在路段。f_i^j 为车辆 b_i 的第 j 个潜在匹配路段，则 b_i 在 f_i^j 上的候选点即为 f_i^j 上距离 b_i 最近的那个点，则有：

$$W_i^j=\arg\min_{q\in f_i^j} d(b_i,q) \tag{10}$$

候选点是 b_i 到 f_i^j 最短距离所对应的点，要么是 b_i 沿垂直于 f_i^j 方向落在 f_i^j 上的点，要么是 f_i^j 边界上的点。

2）构建转移图。获取 b_i 的候选点后，构建有向加权层次转移图，按时间顺序分层，层内和相邻层候选点全连接，并赋予节点和边以标准正态分布为基础的概率值[15]。W_i^j 的概率分布为：

$$N(W_i^j)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}f^{\frac{d(W_i^j,b_i)^2}{2\sigma^2}} \tag{11}$$

式中，σ 为GPS定位误差的标准差（$\sigma=20$ m）；$d(W_i^j,b_i)$ 为 b_i 与 W_i^j 之间的欧氏距离。

针对每条边 $W_i^j\to W_{i+1}^k$，其概率为：

$$Z(W_i^j\to W_{i+1}^k)=\frac{\min\left\{d(b_i,p_{i+1}),d_{rn}(W_i^j,W_{i+1}^k)\right\}}{\max\left\{d(b_i,p_{i+1}),d_{rn}(W_i^j,W_{i+1}^k)\right\}} \tag{12}$$

式中，$d_{rn}(W_i^j,W_{i+1}^k)$ 为两个候选点的最短路径距离；$d(b_i,p_{i+1})$ 为两辆车的欧氏距离；为避免概率超过1，应选择较小的分子和较大的分母。

3）确定匹配路径。采用Viterbi算法搜索转移图中概率最高的路径，确定各车辆的最终候选点 $W_1^{o_1},W_2^{o_2},\cdots,W_n^{o_n}$，以最大化总概率，则有：

$$N(W_1^{o_1})\times\prod_{i=1}^{n-1}Z(W_i^{o_i}\to W_{i+1}^{o_{i+1}})\times N(W_{i+1}^{o_{i+1}}) \tag{13}$$

确定各GPS定位车辆的候选点后，计算相邻两个候选点之间的最短路径，即可得到车辆在红沙泉煤矿封闭区域内的最终匹配路径（车辆行驶轨迹）。通过HMM地图匹配算法，地图服务模块会将车辆行驶轨迹与高精度地图中的道路位置信息进行比对，识别二者之间的差异，从而修正车辆定位误差。

2　实验分析

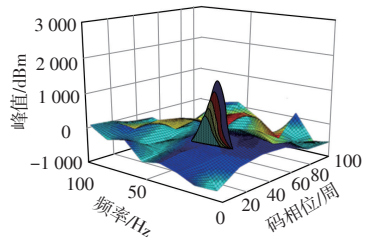
为验证本文方法在实际应用中的性能，在红沙泉煤矿封闭采矿区域进行实地部署与测试。该煤矿以其广阔的开采区域和严格的安全管理著称。实验区地形相对平坦，但存在少量自然障碍物（岩石、小土丘等）以及人工设施（采矿设备、建筑物等）。定位车辆目标包括卡车、挖掘机、巡逻车，在车辆安装定位终端（GPS模块u-blox NEO-M8N）采集车辆位置数据。电子围栏技术参数为：工作电压220 V、报警方式为远程监控、探测距离为10~100 m、误报率≤0.1%、漏报率≤0.01%、功耗≤50 W、工作温度为-40~+70 ℃、防护范围为多边形、抗干扰能力强、防护等级为IP67。

在红沙泉煤矿的封闭区域内，采用本文方法部署电子围栏边界，并运行电子围栏系统Alien ALR-9680 Configuration Software v2.3.1，以检验本文方法的性能表现。电子围栏边界的部署结果见图1，蓝线为红沙泉煤矿的封闭区域边界，红线为本文方法获得的电子围栏边界，两个边界不仅在形状上相同，而且彼此同心。采用信号接收器Impinj Speedway R420接收电子围栏信号，以Alien ALR-9680作为基站设备。为确保信号覆盖实验区域，利用吉赫兹HF 35C信号强度测试仪测量实验区内的信号覆盖情况，每隔5 m均匀分布测试点，测量每个测试点的信号强度，记录数据，调整基站位置，直至无信号盲区。

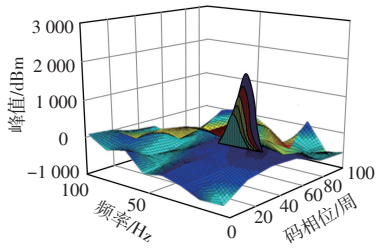


图1　电子围栏边界部署结果

当车辆驶入电子围栏范围内，基于电子围栏技术的车辆定位架构将即刻启动对车辆的监控与定位，记录车辆进出围栏区域的时间和数据；若未经允许的车辆越界而出，车辆定位架构会迅速发出警报，阻止车辆进入危险区域，确保车辆安全。以高精度GPS记录车辆的实际位置为实验基准数据，将上述数据输入Dell PowerEdge R740服务器中，通过Matlab R2022b运行研究算法；并对比引入多普勒频移前后的GPS信号捕获图，以验证本文方法捕获GPS卫星信号的性能。由图2可知，在频率为50 Hz的情形下，未引入多普勒频移时GPS信号码相位约为60周，峰值约为500 dBm；引入多普勒频移后GPS信号码相位约为80周，峰值约为1 200 dBm，GPS信号码相位和峰值均有大幅提升，显著提高了GPS信号质量，使车辆定位结果更加可靠。



a 未引入多普勒频移



b 引入多普勒频移

图2 引入多普勒频移前后的GPS信号捕获图对比

采用车辆定位架构内置的数据层捕获车辆位置信息，并利用HMM地图匹配算法修正定位误差，进行车辆定位检测。设定HMM地图匹配算法候选点搜索半径为8.1 km，GPS信号无法覆盖的区域（即信号盲区）为800 m，状态转移概率参数为0.5，车辆平均行驶速度为60~100 km/h。整个测试流程耗时320 s，即过滤不合理候选点的车辆最大速度限制，其中车辆穿越信号盲区的时间为40 s，即HMM算法的时间间隔。HMM地图匹配算法的地图匹配阈值为GPS定位标准差σ（$\sigma \leqslant 20$ m），此时确定的定位模型是最优状态。定位结果见图3，红色方框表示信号盲区，采用车辆定位架构的数据层能精确确定红沙泉煤矿封闭区域内车辆的具体位置，虽在GPS信号盲区车辆定位略有偏差，但HMM地图匹配算法能修正定位误差，在GPS信号盲区临界点车辆的位置信息能够实现较好的连续性和准确性，确保车辆定位数据的平滑过渡。

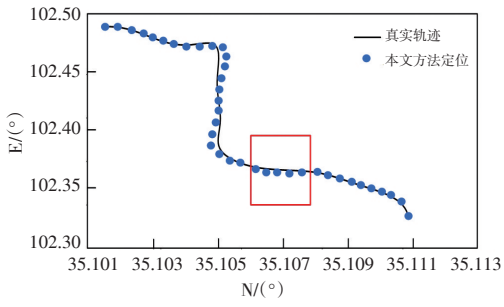


图3 定位结果

利用本文方法对进入红沙泉煤矿封闭区域的11辆车进行定位测试，结果表明，本文方法具有较高的精确性，能确保定位结果的可靠性和稳定性，可在红沙泉煤矿安全监控和车辆管理中发挥重要作用。使用基于电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法前后矿区停车场资源占用情况见图4，可以看出，该车辆定位架构能对红沙泉煤矿封闭区域内的车辆进行定位，并根据车辆的具体位置实施有序调度，显著缓解了矿区内外部停车场的压力，有效降低了道路的拥堵程度，且能明显减少交通事故和安全隐患的发生。



a 使用电子围栏前



b 使用电子围栏后

图4 使用电子围栏前后矿区停车场资源占用情况

3 结 论

本文提出的基于电子围栏技术的红沙泉煤矿封闭区域车辆定位方法，可实现对煤矿封闭区域内车辆的实时、精确定位，在智能识别与预警、自动化监控与数据分析等方面具有显著优势，不仅有助于管理人员准确掌握车辆的位置信息，还能有效防止车辆误入危险区域，降低事故风险。本文主要针对的是红沙泉煤矿封闭区域内的车辆定位，该场景存在少量自然障碍物（岩石、小土丘等），且设计了应对GPS信号盲区的策略，具有一般场景下车辆定位的代表性；但在强电磁干扰、严重雾霾等极端条件下，该方法的稳定性和准确性可能受到影响，因此未来研究可加强对极端环境条件下的系统测试与优化，确保在各种条件下都能提供稳定可靠的定位服务。

参考文献

[1] 张月霞,刘冲. 基于神经网络和路侧单元指纹的车辆定位方法[J]. 计算机仿真,2022,39(4):114-118

[2] 李寿涛,李嘉霖,孟庆瑜,等. 基于点云直方图的回环检测算法和车辆定位方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(8):2 395-2 403

[3] 赖国良,胡钊政,周哲,等. 基于语义似然与高精度地图匹配的智能车辆同时定位与检测[J]. 上海交通大学学报,2024,58(10):1 618-1 628

[4] 盛树轩,荆崇波,蒋朝阳.视觉与单路侧单元辅助的车辆定位方法[J].汽车工程,2022,44(7):1 009-1 017
[5] Lahrech A,Soulhi A. Vehicle Positioninging in Urban Environments Using Particle Filtering-based Global Positioninging System,Odometry,and Map Data Fusion[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering,2023,13(4):3 924-3 938
[6] 马庆禄,白锋,张杰,等.基于激光雷达点云地图的车辆定位与导航[J].光学精密工程,2024,32(16):2 537-2 549
[7] 王飞跃.电子围栏技术及采矿权超层越界开采防范[J].中国矿业,2023,32(增刊1):16-21
[8] 赵澄曦,刘丙万.吉林珲春电子围栏防控野猪危害农田的效果研究[J].动物学杂志,2023,58(4):514-522
[9] 张军,刘静,温秀平.基于可见光通信的车辆自主导航定位滤波算法[J].计算机仿真,2023,40(11):415-418
[10] 姚雨,宋春林,邵江琦.无人机航拍军事车辆实时检测及定位算法[J].兵工学报,2024,45(增刊1):354-360
[11] 师小波,赵丁选,孔志飞,等.基于多传感器信息融合的车辆高精度定位技术[J].中国机械工程,2022,33(19):2 381-2 387
[12] 刘江,谭思伦,蔡伯根,等.基于车路信息交互的车辆卫星定位协同定权方法[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(5):85-96
[13] 沈拓,谢远翔,盛峰,等.基于视频的轨道车辆自主定位方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2024,52(2):174-183
[14] 徐月娟,赵金宝,李明星,等.时空异质性视角下轨道站点客流影响研究[J].地理空间信息,2024,22(10):1-4
[15] 汪威,吕斌,杨轶睿,等.基于多源点云与图像数据的车辆定位与再识别方法[J].激光与光电子学进展,2023,60(10):385-394

(上接第45页)

展等方面认识文化资源以及其中的文化意义，值得进一步研究。建立在大量文化资源数据基础上的研究，对于认识文化的形成发展，解释文化的内涵真谛，提高文化的自信具有重要作用；有利于将“秦岭是中华民族的祖脉和中华文化的重要象征”符号化，从而增强民族文化的凝聚力和软实力，扩大众多中华文化的话语权，为人类文明的发展贡献中华文化的智慧。

参考文献

[1] 罗靖波.新石器时代两湖地区人类活动与环境研究[J].江汉考古,2017(5):72-79
[2] 李鸣瑞.甘南州文化遗产时空分布及环境影响因素[D].兰州:西北师范大学,2021
[3] Bousman B. Prehistoric Settlement Patterns in the Sequnyane Valley, Lesotho[J]. South African Archaeological Bulletin,1988(43):33-37
[4] Xu B C, Pan J H. Analysis of Structural Characteristics and Spatial Distribution of the National Intangible Cultural Heritage in China and Its Policy Implications[J]. Sciences in Cold and Arid Regions,2019,11(5):389-406
[5] 陕西省文物局.陕西省全国第三次文物普查丛书[M].西安:陕西旅游出版社,2012
[6] 何峰,史太润,张诗语.湖南省不可移动文物时空分布特征及其影响因素:以市级以上文物保护单位为例[J].经济地理,2023,43(4):217-228
[7] 李兴发,李艳,高莉萍,等.基于核密度和Voronoi多边形的农村居民点空间布局优化[J].国土与自然资源研究,2024(5):47-51
[8] Levine N. CrimeStat: A Spatial Statistical Program for the Analysis of Crime Incidents[J]. Ned Levine and Associatiates Houston Tx,2000,2(4):187-193
[9] Yu S Y, Hou Z H, Chen X X. Extreme Flooding of the Lower Yellow River Near the Northgrippian-Meghalayan Boundary: Evidence from the Shilipu Archaeological Site in Southwestern Shandong Province, China[J]. Geomorphology,2020(350):106 878
[10] 戴培超,沈正平.水环境变迁与徐州城市兴衰研究[J].人文地理,2013,28(6):55-61
[11] 张珊.秦岭中西部地貌区划及分区对比研究[D].西安:陕西师范大学,2020
[12] 张文超.孢粉揭示的秦岭地区更新世环境变化及其对古人类活动的影响[D].南京:南京大学,2017
[13] Li W, Jiao J P, Qi J W, et al. The Spatial and Temporal Differentiation Characteristics of Cultural Heritage in the Yellow River Basin[J]. PLoS ONE,2022,7(6):e0268921
[14] 周扬,黄晗,刘彦随.中国村庄空间分布规律及其影响因素[J].地理学报,2020,75(10):2 206-2 223
[15] 李伯谦.关于早期夏文化:从夏商周王朝更迭与考古学文化变迁的关系谈起[J].中原文物,2000(1):11-14
[16] 杨东晨.先秦两汉时期汉中与安康自然环境的变迁:兼及自然环境变迁与社会发展的关系[J].汉中师范学院学报(社会科学),1999,17(2):6-12
[17] 薛平拴.隋唐时期陕西境内的人口迁移及其影响[J].中国经济史研究,2004(4):61-70
[18] 周庆华,雷会霞,薛颖.秦岭中华民族的祖脉[J].中国民族,2021(4):74-77
[19] 白宽犁.秦岭与华夏文明初论[J].人文杂志,2020(11):49-57
[20] 廖洪兰.川陕革命老区红色文化研究[D].成都:西南交通大学,2022